

к.т.н. Пересада С. М., к.т.н. Ковбаса С. Н., Болотников А. Ю.

Национальный технический университет Украины «КПИ»

Крыжановский В. П.

ООО НИПФ «ЭПА»

СИСТЕМА ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТЬЮ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СЕТИ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Введение. Электромеханические системы на основе асинхронной машины (АМ) двойного питания (МДП) являются энергосберегающим и экономичным решением для технологических применений с ограниченным диапазоном регулирования угловой скорости. В режиме МДП статор АМ с фазным ротором непосредственно подключается к питающей сети, Рис. 1, в то время как ротор получает питание от преобразователя частоты, мощность которого пропорциональна скольжению [1]. Благодаря этому управление полным потоком мощности, например, в диапазоне скоростей 0.7 – 1.3 от синхронной потребует мощности в роторной цепи, которая примерно равна 30% от номинальной. Если преобразователь частоты в роторной цепи является реверсивным, тогда мощность скольжения в двигательном режиме при скоростях ниже синхронной рекуперируется в сеть. Другим достоинством МДП является возможность независимого регулирования реактивной мощности статорной цепи, в том числе на нулевом уровне, благодаря чему при соответствующем управлении роторным преобразователем вся электромеханическая система будет представлять для сети активную нагрузку и гарантировать синусоидальность потребляемых токов с низким коэффициентом высших гармоник.

Электромеханические преобразователи на основе МДП являются одними из наиболее распространенных в современных ветро-электрогенерирующих системах, поскольку позволяют осуществлять отбор мощности при переменной скорости турбины, повышая за счет этого эффективность отбора. В системах электропривода с МДП сдерживающим для широкого внедрения фактором яв-

ляется трудность их запуска ввиду ограниченности напряжения роторного преобразователя частоты. Традиционно пуск осуществляется прямым включением статора в сеть с дополнительно введенными в роторную цепь пусковыми резисторами или полупроводниковыми пусковыми устройствами. Эта проблема была преодолена в решении [2], [3] для технологических применений, которые допускают разгон двигателя до скоростей выше синхронной при малых нагрузках. При этом не требуются дополнительных пусковых устройств, поскольку для пуска используется основной преобразователь роторной цепи. После разгона МДП осуществляется синхронизация статорной ЭДС с вектором напряжения сети в режиме автономного генератора, подключение к сети и запуск МДП в режим регулирования угловой скорости.

Для решения комплекса теоретических задач по векторному управлению разгоном и синхронизацией, а также регулированию момента (угловой скорости) МДП предложено использовать модифицированную концепцию полеориентирования [4] – [10], которая отличается от классической использованием в качестве базовой системы координат, ориентированной по вектору напряжения сети. С использованием этого подхода разработаны и внедрены унифицированные системы управления МДП при их питании от сети низкого и среднего напряжения. Принципиальным достоинством последней является использование для управления низковольтной силовой электроники (380 В при питающей сети 6 кВ), что снижает стоимость системы и повышает ее надежность за счет использования отработанной технологии построения преобразователей частоты низковольтного диапазона.

В настоящей статье приведено краткое описание унифицированной системы векторного управления угловой скоростью МДП, ориентированной на использование в турбомеханизмах, при питании от сети низкого и среднего напряжений, а также даны результаты экспериментального тестирования.

Функциональная схема электропривода на основе МДП показана на Рис. 2. Алгоритмы векторного управления пуском, синхронизацией и регулирования угловой скорости реализованы программно с использованием унифицирован-

ного контроллера на базе цифрового сигнального процессора TMS320LF2406A [11]. Для управления роторной цепью МДП мощностью 630 кВт использован стандартный силовой модуль преобразователя частоты с номинальным выходным током 540 А и напряжением питания 380 В. Частота векторной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) составляет 2.5 кГц. Для измерения ЭДС статора и напряжения сети использованы измерительные трансформаторы напряжения. Информация о токах статора и ротора снимается с датчиков тока фирмы LEM. Угловое положение и скорость ротора измеряются с помощью частотно-импульсного датчика скорости с разрешающей способностью 2500 имп/об. Для коммутации статорных обмоток использованы быстродействующие вакуумные выключатели с временем срабатывания, равным 10 мс.

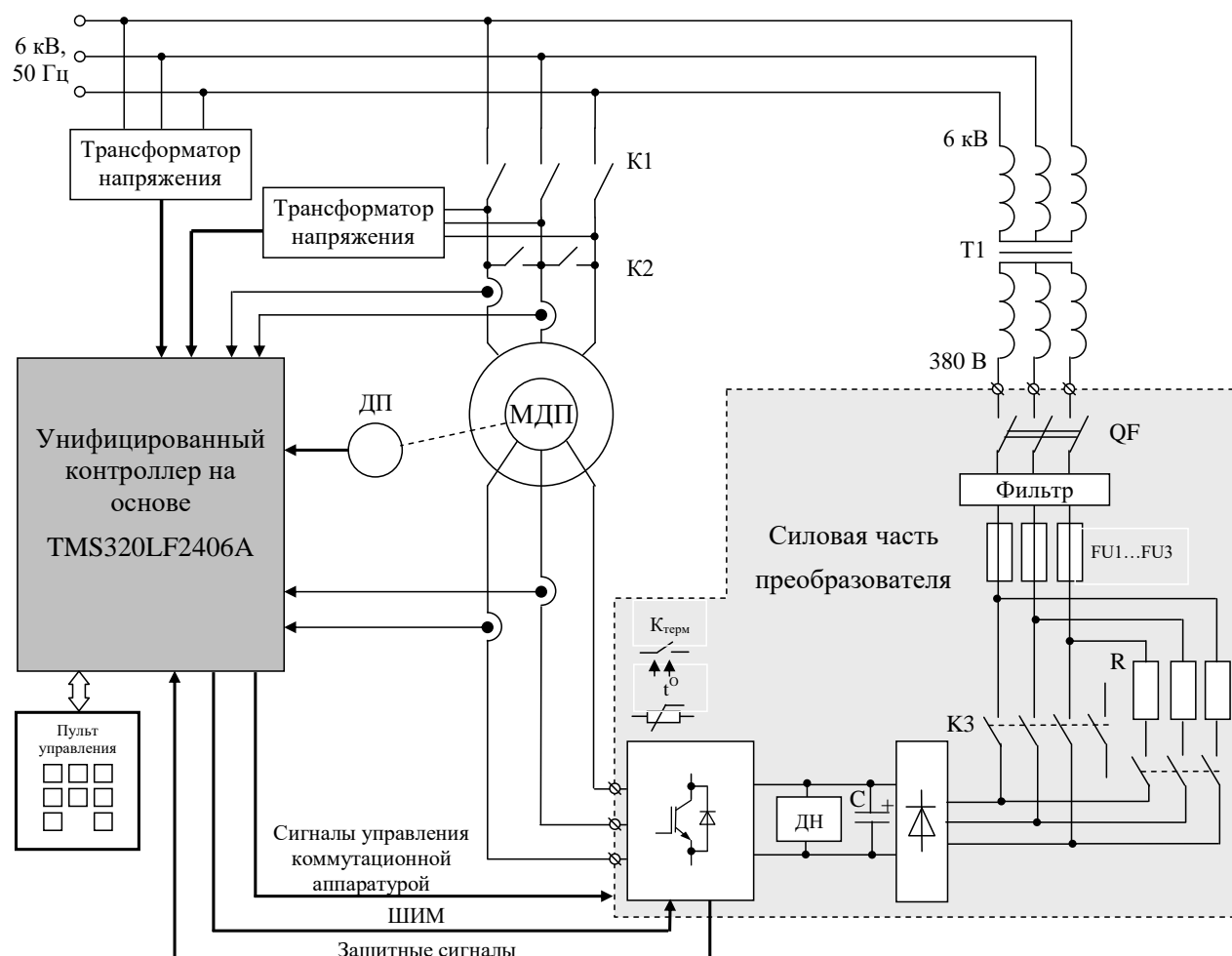


Рис. 1. Функциональная схема ЭП на основе МДП

Запуск электропривода осуществляется в три этапа. На первом этапе в режиме векторного управления производится разгон машины с короткозамкнутым статором до скорости выше синхронной с последующим безопасным раз-

мыканием статорных обмоток, исключаяющим возникновение перенапряжений. На втором этапе выполняется синхронизация ЭДС статора с вектором напряжения сети, после чего на третьем этапе статор МДП подключается к сети и активируется алгоритм регулирования угловой скорости.

Структурная схема системы векторного управления угловой скоростью в режиме МДП, реализующая алгоритмы [5], [8], [10], показана на Рис.2. Алгоритм управления включает в себя разомкнутый регулятор магнитного потока, формирующий задание на потоковую компоненту вектора тока ротора i_{2q} , ПИ-регулятор скорости, нелинейный ПИ-регулятор токов ротора и блоки преобразования координат. На рисунке обозначено: U_m, ε_0 – модуль и угловое положение вектора напряжения сети, ψ_{1q}^* – заданный поток, $\omega^*, \dot{\omega}^*$ – заданная траектория угловой скорости и ее первая производная, $(i_{2d}, i_{2q}), (i_{2a}, i_{2b}), (i_{2dr}, i_{2qr})$ – компоненты вектора тока ротора, $(u_{2d}, u_{2q}), (u_{2a}, u_{2b}), (u_{2dr}, u_{2qr})$ – компоненты управляющего вектора напряжения ротора, i_{2d}^*, i_{2q}^* – моментная и потоковая компоненты заданного вектора тока ротора, ω, θ – угловая скорость и положение ротора, $\tilde{\omega}$ – ошибка отработки угловой скорости, $\tilde{i}_{2d}, \tilde{i}_{2q}$ – ошибки отработки компонент вектора тока ротора, p_n – число пар полюсов, λ – коэффициент трансформации МДП по напряжению, J – момент инерции, $\mu_1 = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} p_n$, L_m – индуктивность намагничивающего контура, L_2 – индуктивность ротора, τ – постоянная времени фильтра, $k_\omega, k_{\omega i} > 0$ – коэффициенты пропорциональной и интегральной составляющих регулятора скорости. Индексы (d,q) приняты для обозначения переменных в системе координат, ориентированной по вектору напряжения сети, (a,b) – в системе координат статора, (dr,qr) – в системе координат ротора.

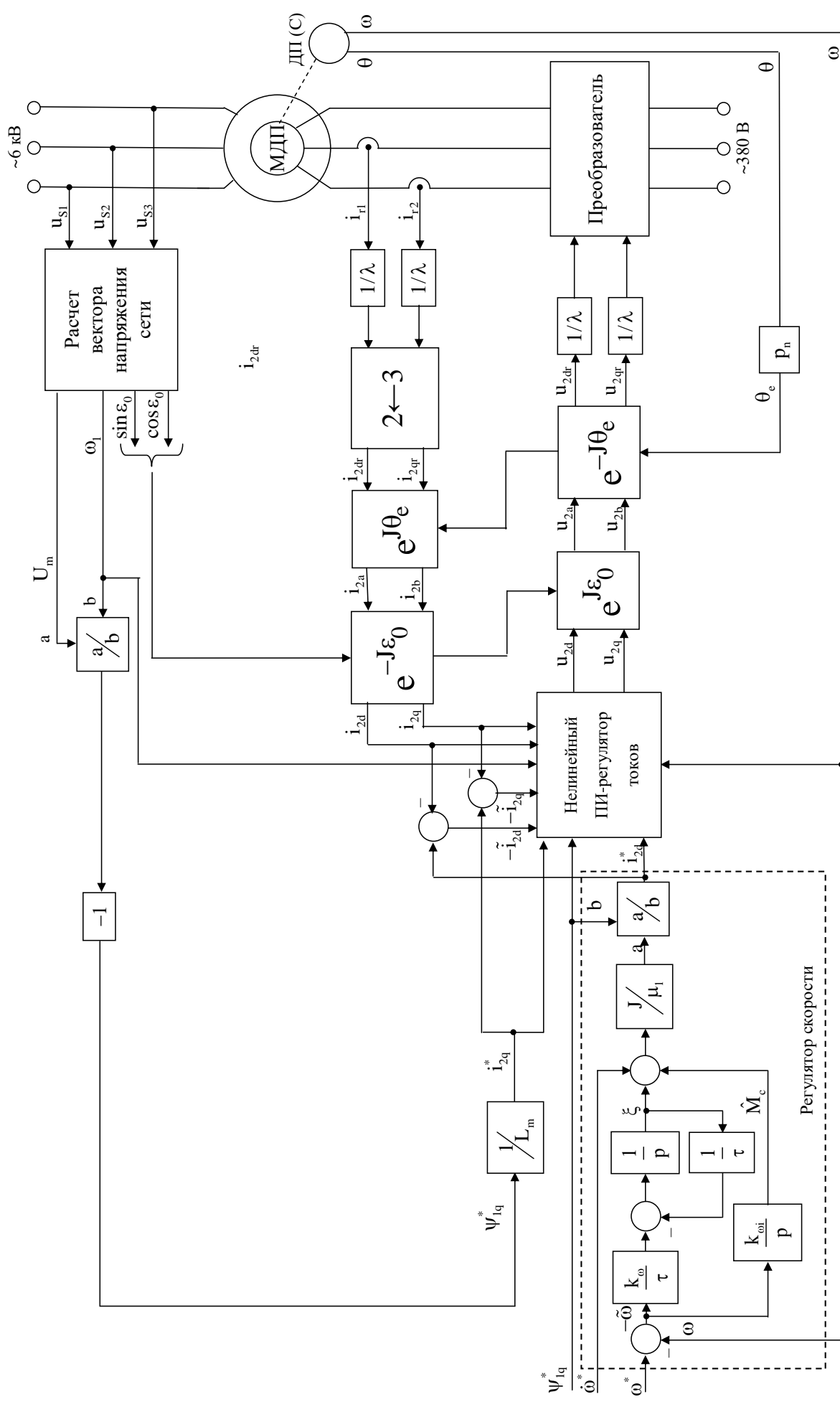
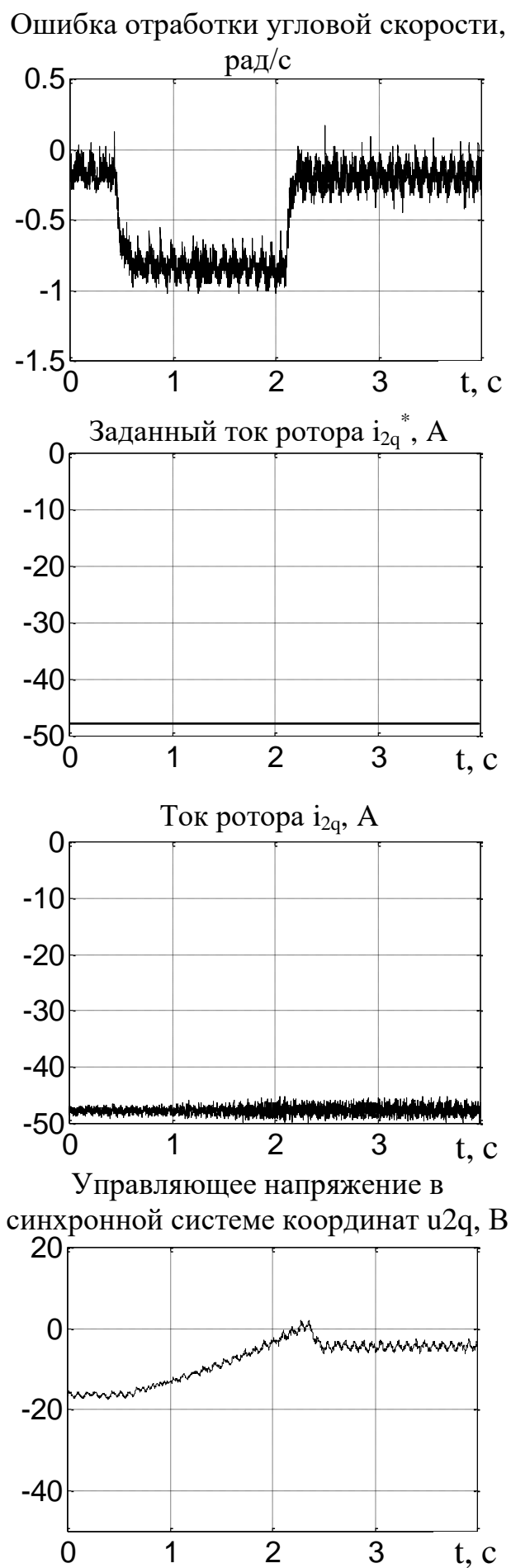
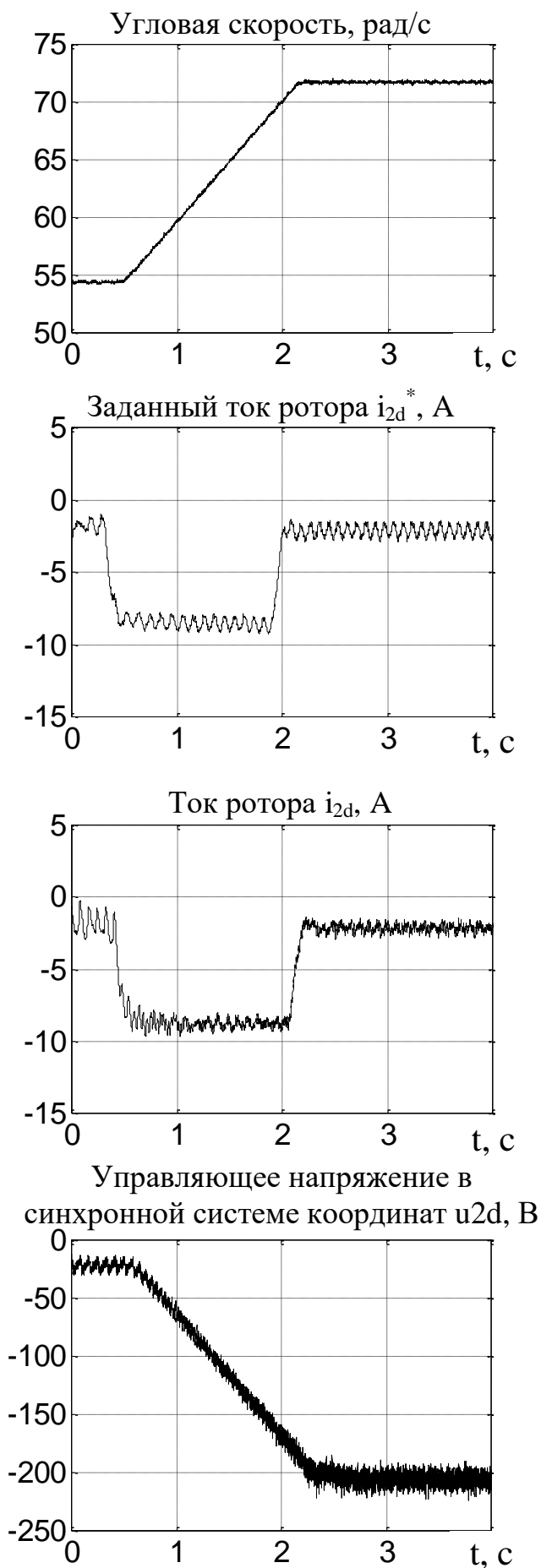


Рис. 2. Структурная схема системы векторного управления угловой скоростью МДП

Результаты экспериментального тестирования. Экспериментальное тестирование выполнялось на установке с МДП РАД 750. Параметры АМ РАД-750 следующие: номинальная мощность 630 кВт, напряжение статора 6 кВ, номинальный ток статора 50 А, номинальный ток ротора 450 А, $R_1 = 0.851$ Ом, $R_2 = 0.831$ Ом, $L_1 = 0.3338$ Гн, $L_2 = 0.3432$ Гн, $L_m = 0.3038$ Гн, коэффициент трансформации $\lambda = 9.5$, число пар полюсов $p_n = 6$. При тестировании использовались следующие настройки регулятора скорости: $k_\omega = 30$, $k_{\omega i} = 0$, $\tau = 0.01$ с.

В процессе тестирования, после завершения синхронизации и подключения статора к сети, от МДП требовалось отработать заданную траекторию угловой скорости первого порядка, начинающуюся со скорости 54.5 рад/с (104% синхронной) и достигающей скорости 72 рад/с (138 % синхронной). В процессе отработки заданной траектории моментный ток составляет 20 % от номинального значения. Графики переходных процессов показаны на Рис. 3, 4.

Статическая ошибка отработки угловой скорости с использованием П-регулятора скорости равна 0.8 рад/с, амплитудное значение фазного напряжения в цепи ротора при скорости 72 рад/с на холостом ходу МДП составляет 200 В (при максимально возможном 311 В). Токи статора и ротора имеют синусоидальную форму.



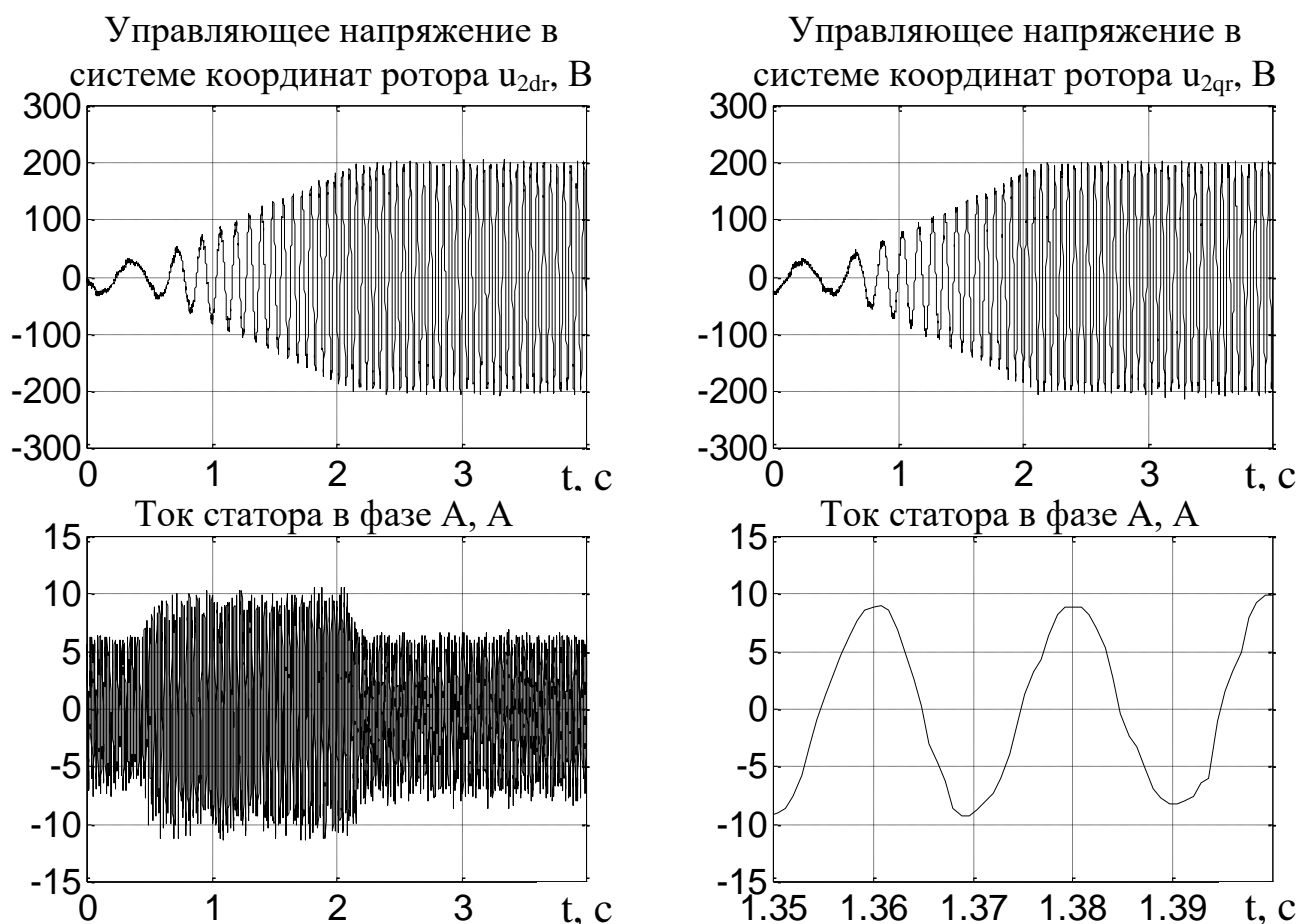


Рис. 3. Переходные процессы при обработке заданной траектории угловой скорости

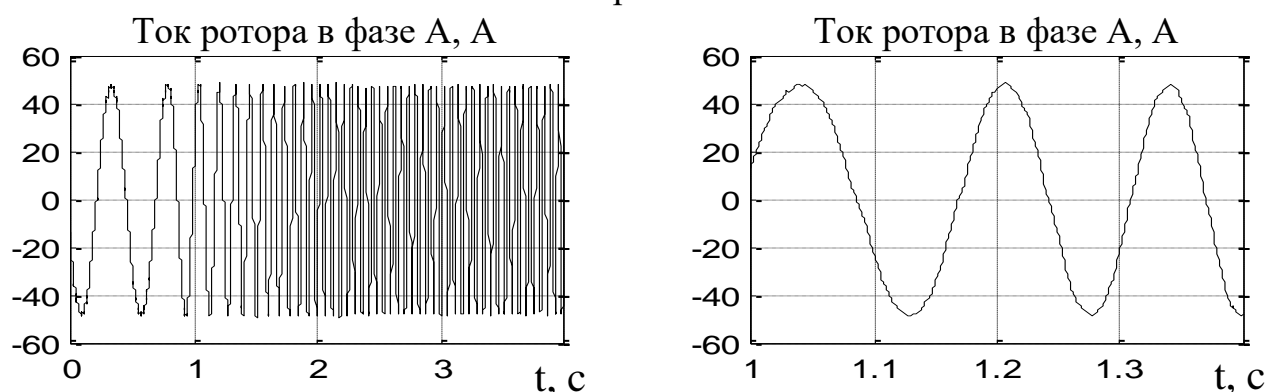


Рис. 4. Ток ротора при обработке заданной траектории угловой скорости

Заключение

Представлена система векторного управления МДП, обеспечивающая ее пуск без применения дополнительных технических средств в цепи ротора, синхронизацию ЭДС статора с вектором напряжения сети, включение статора на сеть и регулирование угловой скорости. Применение разработанной системы позволяет снизить капитальные затраты на оборудование за счет применения

низковольтного преобразователя напряжения, мощность которого пропорциональна диапазону регулирования скорости, а также повысить показатели энергетической эффективности при одновременном достижении динамических и статических показателей качества управления, характерных для типовых регулируемых электроприводов постоянного тока.

Литература

- [1] W. Leonhard. Control of Electric Drives. –Springer-Verlag, Berlin, 1995.
- [2] Пересада С. М., Болотников А. Ю., Ковбаса С. Н. Основанный на принципе пассивности алгоритм векторного управления асинхронным двигателем при питании со стороны ротора // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". –2006. –С. 83–88.
- [3] Пересада С. М., Ковбаса С. Н., Болотников А. Ю., Крижановский В. П. Разработка алгоритмов векторного управления пуском, возбуждением и синхронизацией машины двойного питания и их экспериментальное тестирование. //Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета. Тем. вып. «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». – Днепродзержинск: ДДТУ. –2007. –С. 397 – 402.
- [4] Peresada S., Tilli A. and Tonielli A. Robust active-reactive control of a doubly-fed induction machine // in Proc. Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society – IECON'98. –Aachen, Germany. –Sept. 1998. –P. 1621–1625.
- [5] Peresada S., Tilli A. and Tonielli A. Indirect stator flux-oriented output feedback control of the doubly fed induction machine // IEEE Trans. on Control Systems Technology. – November 2003. –Vol. 11, No. 6. –P. 875–888.
- [6] Peresada S., Tilli A., Tonielli A. Power control of a doubly-fed induction machine via output feedback // Control Engineering Practice. –2004. –Vol. 12, No. 1. –P. 41–57.
- [7] Peresada S. and Korol S. Direct robust active-reactive power control of doubly-fed induction machine // Науч. тр. Кременчугского государственного

политехнического университета "Проблемы создания новых машин и технологий". –2001. –Вып. 1. –С. 147–152.

[8] Пересада С. М., Король С. В. Управление скоростью асинхронной машины двойного питания на основе косвенной ориентации по вектору потокосцепления статора // Техн. електродинаміка. –2003. –№ 1. – С. 14 – 18.

[9] Пересада С. М., Шаповал И. А., Король С. В. Экспериментальное тестирование алгоритмов управления машиной двойного питания // Техн. електродинаміка. –2003. –№ 2. –С. 29–35.

[10] Пересада С. М. и Шаповал И. А. Управление моментом и реактивной мощностью асинхронной машины двойного питания на основе косвенной ориентации по вектору потокосцепления статора // Техн. електродинаміка. – 2002. –№ 6. –С. 13–19.

[11] www.el-drive.com.ua